Technical Note

Public Works Canada | Travaux publics Canada

Solar Programs Office (613) 998-9817

No. 13: April, 1983

Input of Incident Angle Modifier to Computer Programs

1. SYNOPSIS

Solar collectors operate at optimum performance levels when incident radiation is normal to the collector surface. Collector thermal performance decays as incident radiation deviates from the normal, i.e. as the angle of incidence increases.

An incident angle modifier coefficient, b_0, is required by most solar simulation tools as an indicator of collector performance. Some flat plate collectors have a single unique value of b_0 that can be input to the program. Note that b_0 has a negative value and should be input as negative except for FCHART, which requires a positive value, b, equal to $-(b_0)$.

This Technical Note provides a definition of the incident angle modifier, $K_{\tau\alpha}$, and of the incident angle modifier coefficient, b_0. It also presents an input method for collectors such as concentrating parabolic or evacuated tube collectors for which the b_0 method is not applicable. Users should refer to SPO's regularly updated list of PUSH Approved Collectors for appropriate values of b_0, $K_{\tau\alpha}$, and θ.

2. INTRODUCTION

The thermal performance of flat plate solar collectors is adversely affected by incident radiation that is not normal to the collector surface. Performance decreases as the incident angle increases. This effect must be considered when predicting the daily and seasonal thermal performance of non-tracking solar collectors.

3. INCIDENT ANGLE MODIFIER, $K_{\tau\alpha}$

Decrease in performance can be attributed to a number of factors including the transmission-absorption characteristics of cover plates ($\tau\alpha$), the shape of cover h plates (flat or curved), the sensitivity of the absorber plate selective surface to incident angle, and the shading effects of the collector sides on the absorber plate.

The effect of angle of incidence on collector performance as a result of these factors is expressed as the incident angle modifier, $K_{\tau\alpha}$. When incident radiation is normal to the collector surface, $K_{\tau\alpha}$ is 1.0. As the angle of incidence increases, the value of $K_{\tau\alpha}$ decreases and the collector performance decreases (see Figure 1).

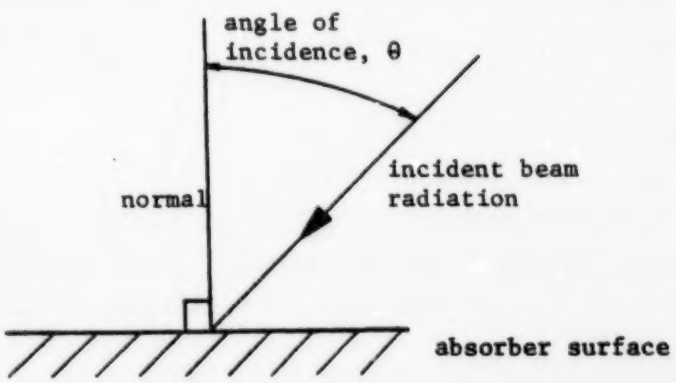


Figure 1: Diagram showing the relationship among the angle of incidence, the normal and beam radiation.

$K_{\tau\alpha}$ can be defined as follows:

$$(K\tau\alpha) = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n}$$

where $(\tau\alpha)$ is the transmittance-absorptance product of a collector with an angle of incident radiation, θ, measured from the normal;

and $(\tau\alpha)_n$ is the transmittance-absorptance product of a collector with incident radiation normal to the collector surface.

Measuring the energy delivered by a collector over a range of incident angles, $K\tau\alpha$ can be plotted against the angle of incidence, θ, to produce a normalized graph for the incident angle modifier curve. Figure 2 shows incident angle modifier curves for a flat plate collector with different cover plates.*

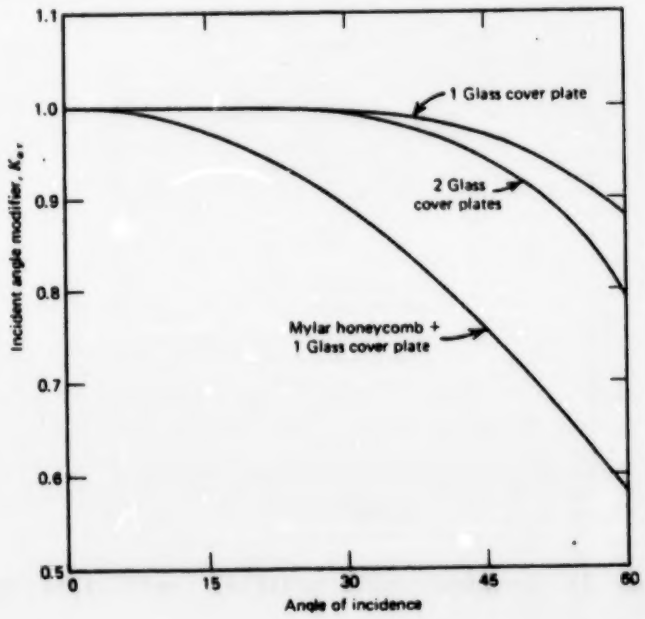


Figure 2: Incident angle modifier, $K\tau\alpha$, as a function of angle of incidence, θ.

* Duffie, John A., and Beckman, William A., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, Toronto, 1980, p. 262.

Each collector model has a unique incident angle modifier curve. These curves are provided on the last page of CSIA Solar Product Data Sheets. In order to model the curve for simulation purposes, it would be necessary to select a number of points from the curve and enter their ($K_{\tau\alpha}$, θ) values. The incident angle modifier coefficient, b_0, provides a more convenient method to enter these values for certain collectors.

4. INCIDENT ANGLE MODIFIER COEFFICIENT, b_0

For some liquid flat plate collectors, the incident angle modifier curve resembles a cosine curve. The same $K_{\tau\alpha}$ and θ values can therefore be replotted using a modified horizontal scale of ($1/\cos\theta - 1$), as shown in Figure 3.*

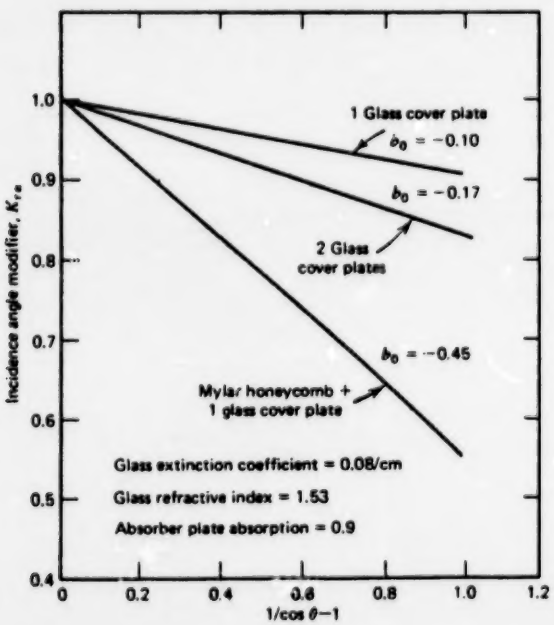


Figure 3: Incident angle modifier coefficient, b_0.

---

* Ibid, p. 263.

The slope of the correlated straight line is defined as b_0, the incident angle modifier coefficient.

$K_{\tau\alpha}$ can then be written as:

$$K_{\tau\alpha} = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = 1 + b_0 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right)$$

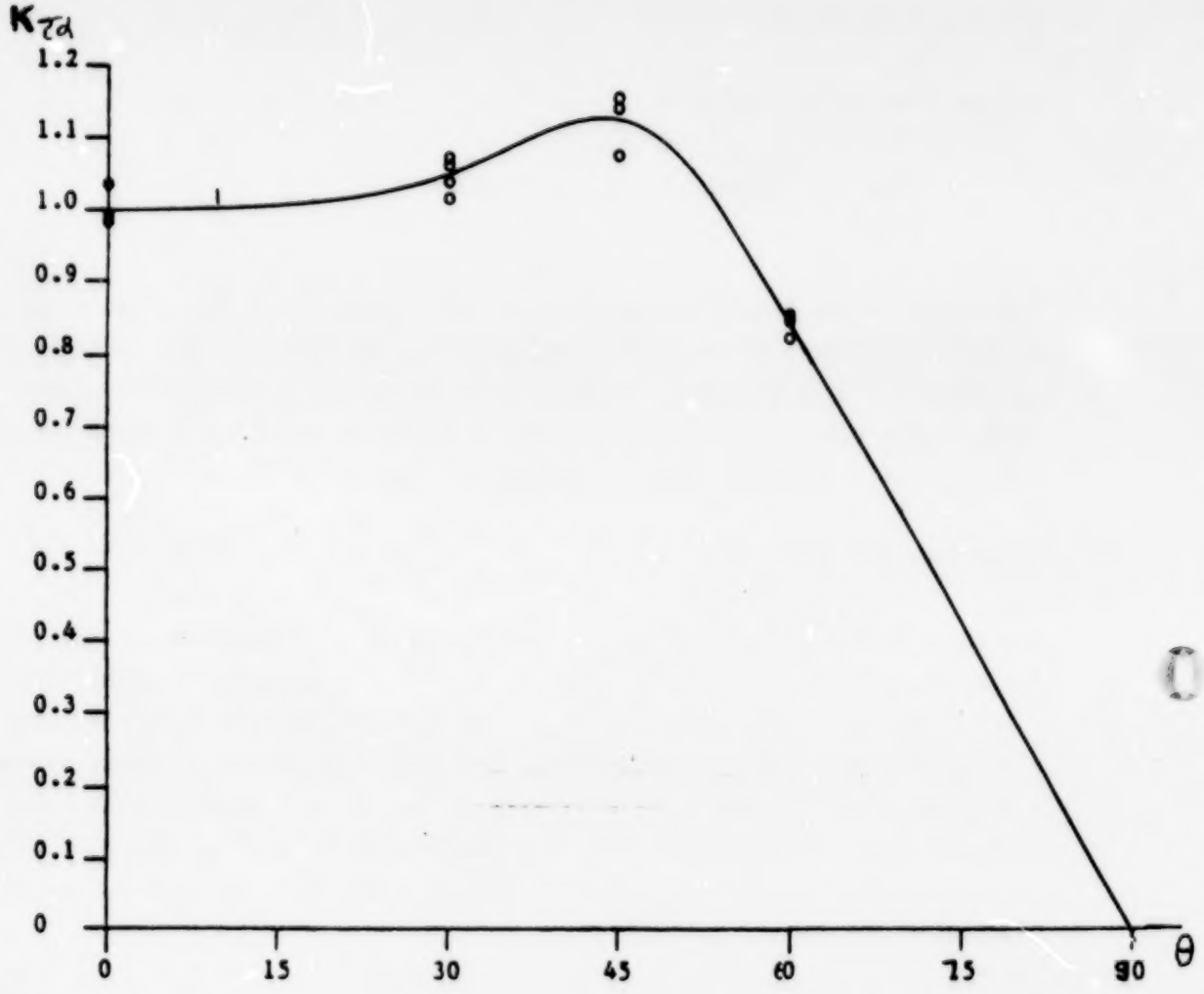
This equation has been incorporated into the FCHART and WATSUN computer programs, so that it is possible to model a collector's performance at any incident angle by inputting a single b_0 value. Note that b_0 represents a negative slope and always has a negative value when input to WATSUN. FCHART has compensated for this and requires a positive value, b, which is equal to $-(b_0)$.

5. COLLECTORS NOT MODELLED BY b_0

The above method works well for the simulation of a collector with a performance curve which, when replotted as shown in Figure 3, produces a straight line from which a constant slope b_0 can be obtained. However concentrating parabolic collectors, evacuated tube collectors, and some flat plate collectors do not plot a straight line. Figure 4 is an example of an incident angle modifier plot that does not produce a straight line. For these collectors it is necessary to revert to first principles as illustrated in Figure 2 and input the appropriate values of $K_{\tau\alpha}$ and θ.

FCHART allows input of eight values $K_{\tau\alpha}$ for values of θ between 10° and 80°. When θ is 0°, $K_{\tau\alpha}$ is assigned a value of 1; when θ is 90°, $K_{\tau\alpha}$ is assigned a value of zero.

This feature is not yet available for WATSUN, but will be incorporated in May 1983.



θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$K_{\tau\alpha}$	1.0	1.0	1.02	1.05	1.12	1.08	.85	.58	.27	0

Figure 4: Example of an incident angle modifier plot that does not produce a straight line

6. RECOMMENDATIONS

The incident angle modifier is an important parameter that affects collector performance. Although computer programs provide a default value, the b_0 value is unique for each collector and should be input correctly whenever it is available. Otherwise, $K_{\tau\alpha}$ and θ values should be used. Refer to SPO's regularly updated list of PUSH approved collectors and associated data, which includes values for b_0, $K_{\tau\alpha}$ and θ as appropriate for each collector. For those who do not already receive the list, an order form is attached.

Further information on b_0 calculations:

Kevin Ford
Design Aids Engineer
Solar Programs Office
Sir Charles Tupper Building
Riverside Drive
Ottawa, Ontario
K1A 0M2

(613) 998-3641

7. FURTHER READING

Duffie, John A. and Beckman, William A., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, Toronto, 1980.

Lunde, P.J., Solar Thermal Engineering, John Wiley and Sons, New York, 1980.

Thomas, W.C. et al., "Incident Angle Modifiers for Flat Plate Solar Collectors: Analysis of Measurement and Calculation Procedures", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 104, November 1982, pp. 349 - 357.

FCHART Version 4.1 User's Manual: A Design Program for Solar Heating Systems. Solar Programs Office, Public Works Canada, December 1982.

ORDER FORM, PUSH APPROVED COLLECTORS LIST

(List of collectors approved for specification on PUSH projects with appropriate b_0, $K_{\tau\alpha}$, θ and other data)

NAME: _____

TITLE: _____

ORGANIZATION: _____

ADDRESS: _____

_____

POSTAL CODE: _____

TELEPHONE: ( ) _____

Return to: Solar Programs Office
Public Works Canada
Sir Charles Tupper Building
Riverside Drive
Ottawa, Ontario
K1A 0M2

Guide technique

Travaux publics Canada | Public Works Canada

Bureau des programmes solaires (613) 998-9817

N° 13: Avril 1983

Entrée du modificateur de l'angle d'incidence dans les programmes machines

1. RÉSUMÉ

On obtient un rendement optimal des capteurs solaires lorsque l'insolation est à la normale par rapport à la surface captante. Le rendement thermique des capteurs diminue au fur et à mesure que le rayonnement incident s'éloigne de la normale, c'est-à-dire au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente.

Pour la plupart des programmes de simulation solaire, il est nécessaire d'utiliser un coefficient de modification de l'angle d'incidence b_0 comme indicateur de rendement du capteur. Plusieurs capteurs plans ont une valeur unique simple, b_0 qui peut être introduite dans le programme. Il est à noter que b_0 a une valeur négative et devrait être introduit comme tel sauf dans le cas de FCHART, qui demande une valeur positive b égale à $-(b_0)$.

Ce Guide technique définit le modificateur de l'angle d'incidence, $K_{\tau\alpha}$, et le coefficient de modification de l'angle d'incidence b_0. Il propose également une méthode d'entrée pour les capteurs tels que les capteurs paraboliques à concentration ou les capteurs à tube sous vide pour lesquels la méthode du b_0 ne peut être utilisée. Les intéressés devraient se référer à la liste récente des capteurs approuvés AUES pour les valeurs appropriées de b_0, $K_{\tau\alpha}$ et θ.

2. INTRODUCTION

Le rendement thermique des capteurs solaires plans est affecté par le rayonnement incident qui n'est pas normal par rapport à la surface du capteur. Le rendement diminue au fur et à mesure qu'augmente l'angle d'incidence. Il faut tenir compte de cela lorsqu'on prévoit le rendement quotidien et saisonnier des capteurs entièrement fixes.

3. MODIFICATEUR DE L'ANGLE D'INCIDENCE, $K_{\tau\alpha}$

La diminution du rendement peut être attribuée a un certain nombre de facteurs, notamment les facteurs de transmission absorption du couvercle ($\tau\alpha$), la forme des couvercles (plats ou courbés), la sensibilité de la couche sélective de l'absorbeur à l'angle d'incidence et les effets d'ombrage des parois du capteur sur l'absorbeur.

L'impact de l'angle d'incidence sur le rendement du capteur en présence de ces différents facteurs est exprimé sous forme d'un modificateur de l'angle d'incidence, $K_{\tau\alpha}$. Lorsque le rayonnement incident est normal par rapport à la surface captante $K_{\tau\alpha}$ est égal à 1.0. Au fur et à mesure qu'augmente l'angle d'incidence, la valeur de $K_{\tau\alpha}$ diminue, de même que le rendement du capteur (voir la figure 1).

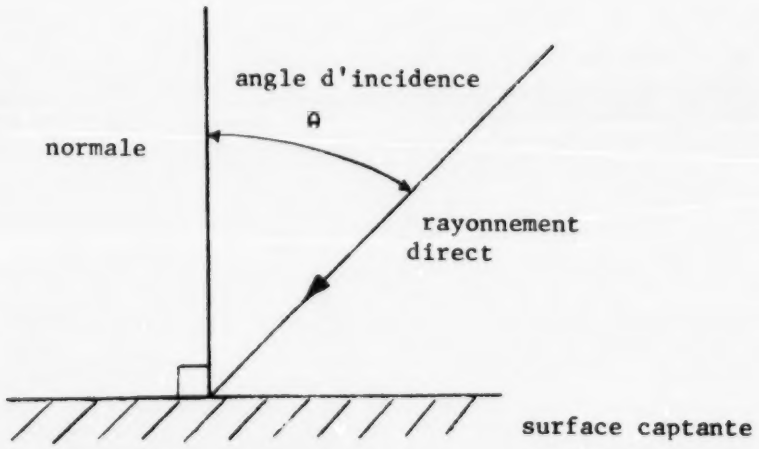


Figure 1: Schéma illustrant la relation entre l'angle d'incidence, la normale et le rayonnement direct.

$K_{\tau\alpha}$ peut être défini de la façon suivante:

$$K_{\tau\alpha} = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n}$$

où $(\tau\alpha)$ est le produit de la transmission et de l'absorption d'un capteur avec un angle d'insolation, θ, mesuré par rapport à la normale;

et $(\tau\alpha)_n$ est le produit de la transmission et de l'absorption d'un capteur avec un rayonnement incident normal par rapport à la surface.

On peut mesurer l'énergie fournie par un capteur en fonction d'une gamme d'angles d'incidence, $K_{\tau\alpha}$, et tracer les courbes par rapport à l'angle d'incidence, θ, afin de produire un graphique normalisé de la courbe du modificateur de l'angle d'incidence. La figure 2 illustre des courbes de modificateurs de l'angle d'incidence pour un capteur plan doté de divers types de couvercles.*

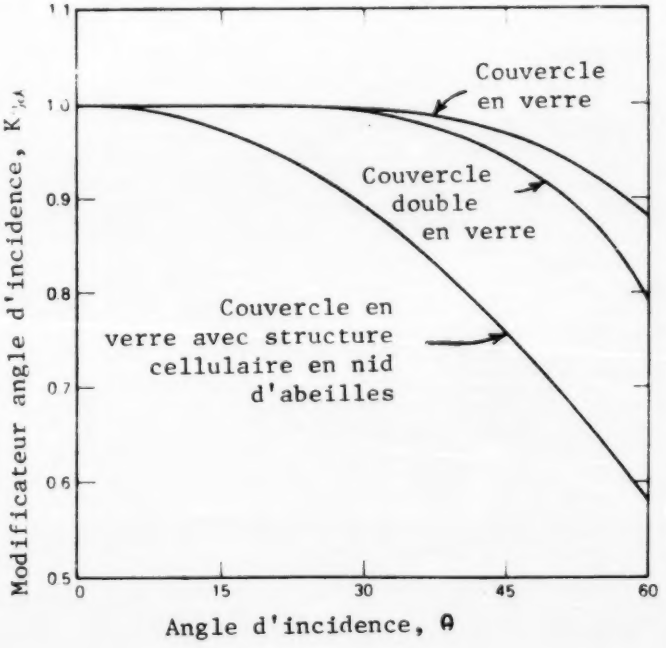


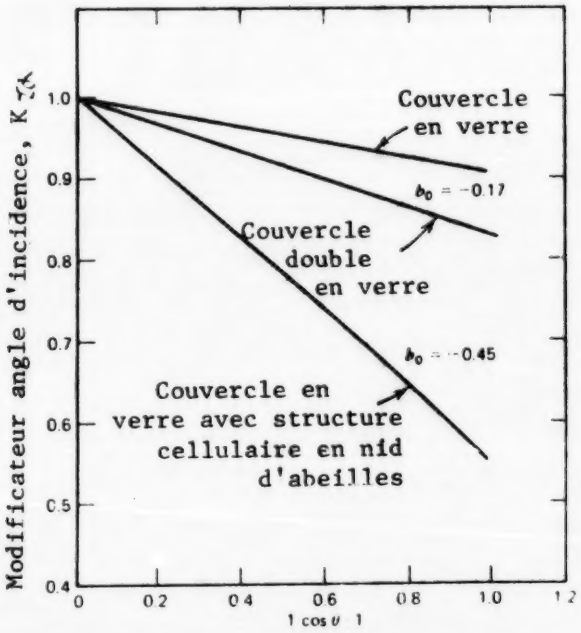
Figure 2: Modificateur de l'angle d'incidence, $K_{\tau\alpha}$, comme fonction de l'angle d'incidence, θ.

* Duffie, John A., and Beckman, William A., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, Toronto, 1980, p. 262.

A chaque modèle de capteur correspond une courbe de modificateur d'angle d'incidence unique. Ces courbes sont présentées à la dernière page des feuilles de renseignements sur les équipements solaires (Solar Product Data Sheets) de l'AISC. Pour modéliser la courbe à des fins de simulation, il faudrait sélectionner un certain nombre de points et introduire leurs valeurs ($K_{\tau\alpha}$, θ). Le coefficient du modificateur de l'angle d'incidence, b_0, fournit une méthode plus commode d'entrer ces valeurs pour certains capteurs.

4. COEFFICIENT DE MODIFICATION DE L'ANGLE D'INCIDENCE, b_0

Pour quelques capteurs plans à liquide, le couvercle ressemble à une cosinusoïde. On peut donc retracer les mêmes valeurs $K_{\tau\alpha}$ et θ en utilisant une échelle horizontale modifiée ($1/\cos\theta - 1$), comme l'illustre la figure 3.*



Coefficient de diffusion du verre = 0.08 cm
Indice de réfraction du verre = 1.53
Coefficient d'absorption de l'absorbeur = 0.9

Figure 3: Coefficient de modification de l'angle d'incidence, b_0.

* Idem., p. 263.

La pente de la ligne droite corrélative est définie comme b_0, le coefficient de modification de l'angle d'incidence.

$K\tau\alpha$ peut être écrit de la façon suivante:

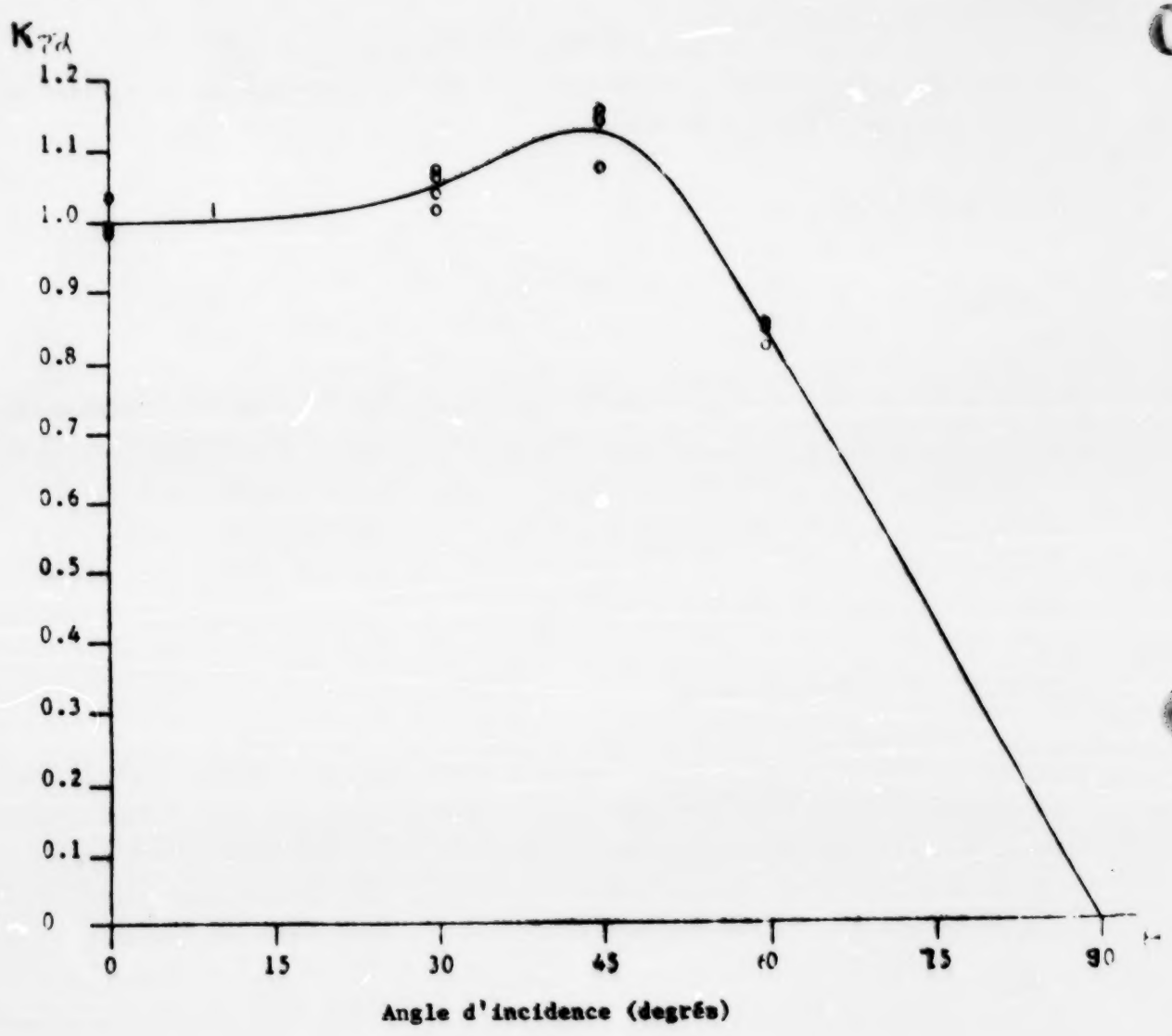
$$K\tau\alpha = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = 1 + b_0 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right)$$

Cette équation a été intégrée dans les programmes machines FCHART et WATSUN; il est donc possible de modéliser le rendement d'un capteur à n'importe quel angle d'incidence, en introduisant une simple valeur. Il est à noter que b_0 représente une pente négative et a toujours une valeur négative lorsqu'il est introduit dans WATSUN. Dans le cas de FCHART, il faut introduire une valeur positive, b, égale à $-(b_0)$.

5. CAPTEURS NON MODÉLISÉS PAR b_0

La méthode décrite ci-dessus convient à la simulation d'un capteur dont la courbe de rendement, lorsqu'elle est re-tracée comme à la figure 3, produit une ligne droite à partir de laquelle on peut obtenir une pente constante b_0. C'est le cas de la plupart des capteurs plans. Cependant, les capteurs plans avec couvercles courbés, les capteurs paraboliques à concentration et les capteurs à tube sous vide ne produisent pas une ligne droite. La figure 4 illustre un exemple d'un modificateur d'angle d'incidence qui ne peut pas produire une ligne droite. Dans ce cas, il est nécessaire de revenir au principe de base présenté à la figure 2 et d'introduire les valeurs appropriées de $K\tau\alpha$ et de θ.

FCHART permet d'introduire 8 valeurs $K\tau\alpha$ pour les valeurs de θ comprises entre 10° et 80°. Lorsque θ est égal à 0°, la valeur 1 est attribuée à $K\tau\alpha$; lorsque θ est égal à 90°, la valeur zéro est attribuée à $K\tau\alpha$. Cette fonction n'est pas encore disponible dans WATSUN, mais devrait l'être en mai 1983.



θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$K_{\tau\alpha}$	1.0	1.0	1.02	1.05	1.12	1.08	.85	.58	.27	0

Figure 4: Exemple d'une courbe d'un modificateur d'angle d'incidence qui ne peut pas produire une ligne droite.

6. RECOMMANDATIONS

Le modificateur de l'angle d'incidence est un paramètre important qui influe sur le rendement du capteur. Même si les programmes informatiques contiennent une valeur implicite, la valeur b_0 est unique à chaque capteur et devrait être introduite correctement chaque fois qu'elle est disponible autrement les valeurs $K\tau\alpha$ et θ devraient être utilisées. Le Bureau des programmes solaires publie une liste régulièrement mise à jour des capteurs approuvés pour PUSH et des données connexes, y compris les valeurs b_0, $K\tau\alpha$ et θ de chaque capteur.

Pour obtenir de plus amples renseignements sur les calculs de b_0:

Kevin Ford
Ingénieur, aides à la conception
Bureau des programmes solaires
Édifice Sir Charles Tupper
Riverside Drive
Ottawa, Ontario
K1A 0M2

(613) 998-3641

7. AUTRES DOCUMENTS

Duffie, John A. and Beckman, William A., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, Toronto, 1980.

Lunde, P.J., Solar Thermal Engineering, John Wiley and Sons, New York, 1980.

Thomas, W.C. et al., "Incident Angle Modifiers for Flat Plate Solar Collectors: Analysis of Measurement and Calculation Procedures", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 104, Novembre 1982, p. 349 à 357.

FCHART Version 4.1 User's Manual: A Design Program for Solar Heating Systems. Solar Programs Office, Public Works Canada, Decembre 1982.

BON DE COMMANDE, LISTE DE CAPTEURS APPROUVÉS AUES

(Liste de capteurs approuvés pour fins d'utilisation dans les projets AUES, avec les valeurs appropriées de b_0, $K_{\tau\alpha}$, θ et autres.)

NOM: _____

TITRE: _____

ORGANISME: _____

ADRESSE: _____

_____

CODE POSTALE: _____

TÉLÉPHONE: ( ) _____

Retournez à: Bureau des programmes solaires
Travaux publics Canada
Édifice Sir Charles Tupper
Promenade Riverside
Ottawa, Ontario
K1A 0M2